

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.11.022

有机工质在透平静叶栅内流动的数值研究

董焕宇¹, 王 智^{2*}

(1. 大唐国际 江山新城热电有限责任公司, 浙江 江山 304100;

2. 华北电力大学, 能源动力与机械工程学院, 河北 保定 071003)

摘要:针对有机工质在透平中流动产生气动损失的问题,对有机工质 R245fa 在 SC11 静叶栅中的流动进行了数值研究。提出了考虑粘性的有机工质物性定义方法,分别采用理想气体状态方程和 SW 气体状态方程对透平静叶栅中的流场进行了研究,对比了采用不同气体状态方程得到的压缩因子及密度沿叶型表面的分布规律,评价了有机工质在透平静叶栅内流动的非理想程度。分析了有机工质在透平静叶栅内流动的参数分布,并得到了有机工质在静叶栅内不同区域的膨胀规律。研究表明,应用理想气体状态方程与 SW 气体状态方程得到的计算结果偏差很大,理想气体状态方程不适用于有机工质在透平内流动的计算;在透平静叶栅中,叶片压力面压降幅度较吸力面更平缓,吸力面下游马赫数达到最大值,叶片尾迹中存在损失。

关键词:有机工质;数值模拟;气体状态方程

中图分类号:TM611;TK261

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)11-1425-04

Numerical simulation of organic flow in static turbine cascades

DONG Huan-yu¹, WANG Zhi²

(1. Datang International Jiangshan Newtown Thermal Power Co. Ltd., Jiangshan 304100, China; 2. School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Aiming at the problem of aerodynamic loss generated by organic flow in turbine, the inflow characteristics in SC11 static cascade using R245fa was numerically studied. Definition methods of properties for viscous organic fluid were proposed. Adopting state equation of ideal-gas and SW equation, the flow fields of static blades utilizing numerical simulation method were respectively analyzed. Different variations of compressibility factor and density along the cascade path using different equations were compared. The extent of non-ideal state of organic flow in static turbine cascade was evaluated. The distribution of organic flow parameters were analyzed, and expansion rules of different regions in static cascade were obtained. The results indicate that there are big deviations of parameters using ideal-gas equation of state compared with SW equation, so ideal-gas equation is no longer applicable in numerical simulation of organic flow in turbine. In static turbine cascade, pressure drop amplitude on pressure side is more smooth than that in blade suction surface. Mach number appears the max value in the downstream of the suction surface. Loss exists in the wake of the blade.

Key words: organic working fluid; numerical simulation; gas equation of state

0 引 言

世界性的能源短缺与环境污染严重影响了能源的利用,而有机朗肯循环发电技术在回收低品位热量、提高能源利用率方面发挥着越来越重要的作用。低温热

能是指品位较低的热能,一般温度低于 200 ℃^[1]。这些能源种类繁多,能量巨大,包括太阳能、地热能、海洋温差能等可再生能源和工业余热^[2-4]。这些能源通过低温热能发电系统的转换,可以提供数量可观的高品位电能,提高能源的利用效率,同时不对环境产生污染。

收稿日期:2014-08-14

作者简介:董焕宇(1978-),男,山西长治人,工程师,主要从事火电厂运行、检修方面的研究。E-mail:dhyl13@sohu.com

通信联系人:王智,男,博士,副教授。E-mail:wangzhi@ncepu.edu.cn

有机工质的热力学特性对有机朗肯循环各个热力过程有重要影响。近年来,研究者对有机工质郎肯循环发电系统开展了大量的理论和实验研究,对多种工质在不同热源温度下的有机工质郎肯循环发电系统性能进行了研究^[5-7],测定了多种工质的工作稳定性,并测试了膨胀机性能^[8-9]。

对于蒸汽透平或者燃气透平而言,其气动设计已达到很高水平。但有机朗肯循环系统中使用的透平在设计制造中存在较多待解决的问题。由于有机工质的热物理性质与蒸汽有较大的区别,导致透平内流动较为复杂,各种损失较大。在有机朗肯循环涡轮的选择和设计时,必须综合有机工质透平的气动布局和叶型的优化等多方面因素进行考虑。针对不同有机工质进行高性能透平的设计和选型工作具有重要的现实意义。

与常规工质相比,有机工质分子量大、密度大,工质在透平内沿程流动参数存在明显差异,工质物性计算方法与常规工质也需区别对待^[10-11]。特别是有机工质透平内工质流量小,单级焓降大,气流膨胀比高,音速低于蒸汽的音速,透平内部流动流动易出现超音速流动,马赫数通常大于普通透平,叶栅中的流动特点也需重点考察。

本研究通过数值模拟方法,分析有机工质 R245fa 在 SC11 二维叶栅中的流动特点,为低品位热能发电系统提供理论依据。

1 计算模型的建立

1.1 物理模型与边界条件

SC11 叶型的几何构型和边界条件的设置如图 1 所示。入口给定压力和流动方向,出口给定压力,叶片表面为绝热无滑移的固壁边界,并在流动区域间设置周期性边界。叶片进出口参数的设置如表 1 所示。

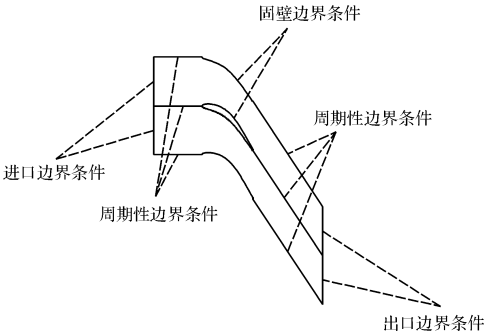


图 1 SC11 叶型几何构型和边界条件

表 1 SC11 叶型进出口参数

参数	数值
入口压力 P_0/MPa	3.32
入口温度 T_0/K	443.82
出口压力 P_2/MPa	2.206
压比	1.64

1.2 有机工质物性定义

气体状态方程是描述气体压力 - 比容 - 温度 ($P-v-T$) 间关系的基础方程。理想气体状态方程如下式所示:

$$Pv = RT \tag{1}$$

式中: P —压力, Pa; T —温度, K; v —比容, $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; R —气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

SW 方程在计算工质真实物性参数方面的准确性很高,常被当成标准参考方程。SW 方程中气体状态方程如下式所示^[12]:

$$\alpha(\delta, \tau) = \alpha^0(\delta, \tau) + \alpha^r(\delta, \tau) = \alpha^0(\delta, \tau) + n_1 \delta \tau^{0.25} + n_2 \delta \tau^{1.25} + n_3 \delta \tau^{1.5} + n_4 \delta^3 \tau^{0.25} + n_5 \delta^7 \tau^{0.875} + n_6 \delta \tau^{2.375} e^{-\delta} + n_7 \delta^2 \tau^{2.00} e^{-\delta} + n_8 \delta^5 \tau^{2.125} e^{-\delta} + n_9 \delta \tau^{3.50} e^{-\delta^2} + n_{10} \delta \tau^{6.5} e^{-\delta^2} - n_{11} \delta^4 \tau^{4.75} e^{-\delta^2} + n_{12} \delta^2 \tau^{12.5} e^{-\delta^3} \tag{2}$$

式中: $\alpha(\delta, \tau) = \alpha(\rho, T)/RT$ 。

其中: $\alpha(\rho, T)$ —亥姆霍兹自由能; $\delta = \rho/\rho_c$, ρ_c —工质临界密度; $\tau = T/T_c$, T_c —工质临界温度; $n_1 \sim n_{12}$ —系数。

粘度的计算公式如下式所示:

$$\mu = 6.3 \times 10^{-7} \frac{M_w^{0.5} P_c^{0.6667}}{T_c^{0.1667}} \left(\frac{T_r^{1.5}}{T_r + 0.8} \right) \tag{3}$$

式中: $T_r = T/T_c$; T_c —临界温度, K; M_w —摩尔分子质量, $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$; P_c —临界压力, Pa。

导热系数的计算公式如下式所示:

$$k = \mu(c_p^0 + 1.25R) \tag{4}$$

式中: c_p^0 —按理想气体计算的定压比容, $c_p^0 = -55.23 + 3.6645T - 2.7336 \times 10^{-3}T^2 + 7.207 \times 10^{-7}T^3$; T —温度, K; R —理想气体常数。

1.3 网格结构和数值求解方法

网格结构为三角形非结构网格,并对壁面网格进行加密处理,计算域网格划分如图 2 所示。

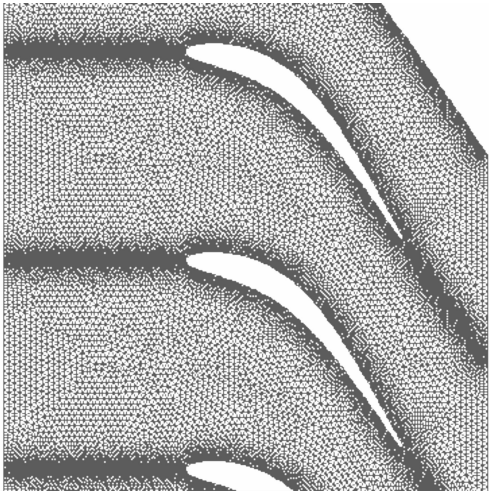


图 2 计算域网格划分

由于有机工质在叶栅中的流动可压缩,本研究设置基于密度的求解器;流动为湍流,湍流模型选择 Realizable $k-\varepsilon$, 壁面处理方式为标准壁面函数;采用二阶迎风格式离散流动方程,QUICK 格式离散湍动能和湍流耗散率方程。

2 计算结果分析

2.1 不同气体状态方程结果比较

本研究分别按照理想气体状态方程和 SW 方程计算所得沿叶型表面的压缩因子和密度变化曲线如图 3 所示,横坐标 X/C 代表计算点坐标与叶片弦长之比。

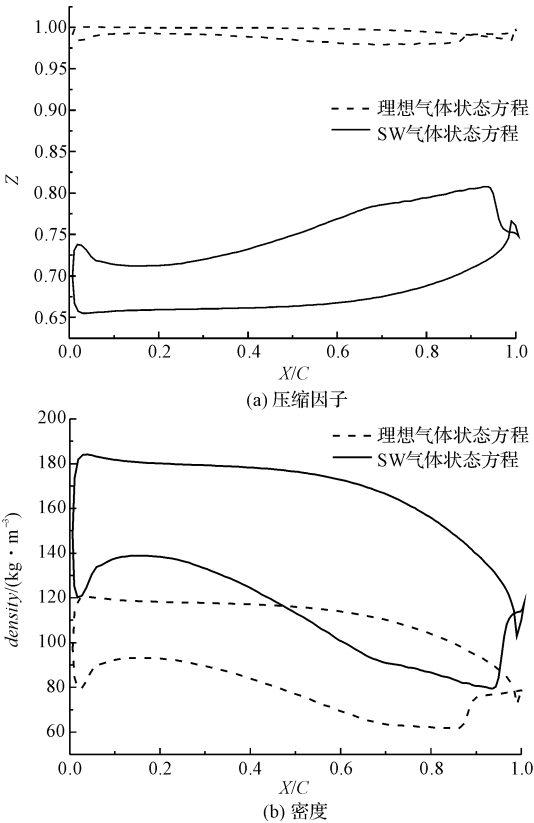


图3 叶片表面工质气动参数分布曲线图

压缩因子表明气体偏离理想状态的程度,压缩图如图 3(a) 所示。理想气体状态方程下得到的压缩因子数值恒定在 1 附近,而按 SW 方程计算的叶片入口压缩因子为 0.7,较大地偏离了理想状态,随着气体的膨胀,数值有所增加,说明工质的非理想程度降低。

密度变化曲线如图 3(b) 所示,随着气体的膨胀,密度值逐渐减小,两方程计算的密度值变化趋势相同,二者偏差在叶片前缘达到最大,随着膨胀过程的进行,偏差逐渐减小。

经比较分析可知,两种状态方程计算得到的参数

差异很大,工质 R245fa 在汽轮机叶栅中的流动体现了强烈的非理想性,理想气体状态方程不再适用。需要采用 SW 气体状态方程进行计算。

2.2 采用 SW 气体状态方程数值结果分析

SW 气体状态方程可得到准确的数值研究结果。沿叶型表面静压力分布曲线如图 4 所示。从图中可以看出,工质由入口压力膨胀到出口给定压力,叶片压力面和吸力面压力均下降,压力曲线参数分布连续。当 X/C 小于 0.6 时,压力面压降幅度小,吸力面压降幅度大;工质膨胀主要发生在吸力面,压力面工质膨胀程度较小。 X/C 大于 0.6 时,压力面压降幅度增大,吸力面和压力面间压差增大,该区域为工质主要膨胀区域。

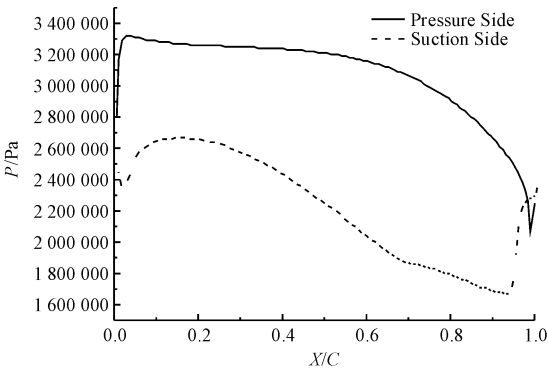


图4 沿叶型表面静压力分布

静压分布云图如图 5 所示。可以看出,压力面压力大于吸力面压力,且压力面压力变化相较吸力面更平缓。

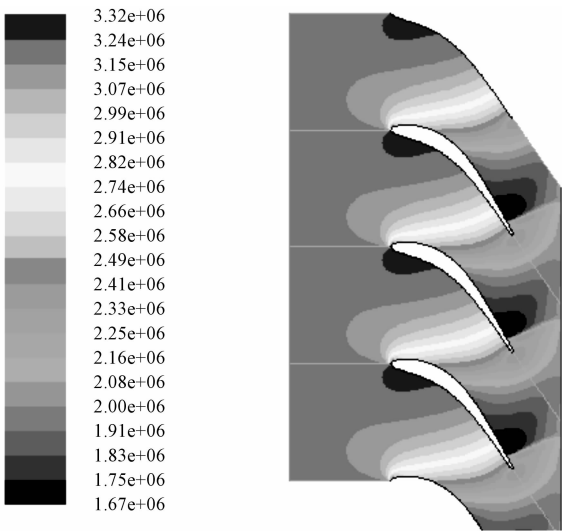


图5 叶片流场压力分布云图

马赫数分布云图如图 6 所示。可以看出,工质在进入叶片时的流速很小,随着气体的膨胀和加速,马赫数逐渐增大,且吸力边马赫数大于压力边,在吸力边下

游马赫数达到最大值 0.97。由于叶栅存在一定的尾缘厚度,尾迹中存在能量损失,工质在叶片尾迹中的流速降低,马赫数减小。

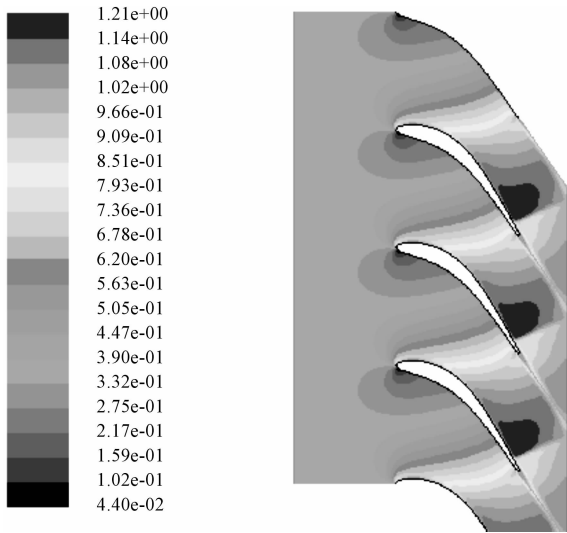


图 6 叶片流场马赫数分布云图

3 结束语

本研究通过数值模拟方法,SW 状态方程,计算分析了工质 R245fa 沿 SC11 叶型表面的参数分布情况,结果表明:

(1)有机工质在叶栅中的膨胀体现了强烈的非理想性,理想气体状态方程的模拟结果与 SW 方程相比较存在有很大的偏差,理想气体状态方程不再适用于有机工质的物性计算;

(2)叶栅通道中,叶片压力面压力大于吸力面,且压降变化更平缓;

(3)吸力边马赫数大于压力边,最大值出现在吸力边下游,值约为 0.97,且叶片尾迹中马赫数很小,存在叶型损失。

参考文献(References):

[1] HUNG T C, WANG S K, KUO C H. A study of organic working fluids on system efficiency of an ORC using low-grade energy sources[J]. **Energy**, 2009, 35(2010): 1403-1411.

[2] LENNARD D E. The viability and best locations for ocean thermal energy conversion systems around the world[J]. **Renewable Energy**, 1995, 6(3): 359-65.

[3] TANNER D. Ocean thermal energy conversion: current overview and future outlook[J]. **Renewable Energy**, 1995, 6(3): 367-73.

[4] 顾伟,翁一武,曹广益,等. 低温热能发电的研究现状和发展趋势[J]. **热能动力工程**, 2007, 22(2): 115-119.

[5] MAGO P J, CHAMRA L M, SOMAYAJI C. Performance analysis of different working fluids for use in organic Rankine cycles[J]. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy**, 2007, 221(3): 255-264.

[6] HUNG T C, WANG S K, KUO C. H., et al. A study of organic working fluids on system efficiency of an ORC using low-grade energy sources[J]. **Energy**, 2010, 35(3): 1403-1411.

[7] GUO T, WANG H X, ZHANG S J. Comparative analysis of CO₂-based transcritical Rankine cycle and HFC245fa-based subcritical organic Rankine cycle (ORC) using low-temperature geothermal source[J]. **Science in China Series E: Technological Sciences**, 2010, 53(6): 1869-1900.

[8] WANG X D, ZHAO L. Analysis of zeotropic mixtures used in low-temperature solar Rankine cycles for power generation[J]. **Solar Energy**, 2009, 83(5): 605-613.

[9] 李艳,连红奎,顾春伟. 有机朗肯循环系统及其透平设计研究[J]. **工程热物理学报**, 2010, 31(12): 2014-2018.

[10] CONGEDO P M, CORRE C, CINNELLA P. Numerical investigation of dense-gas effects in turbomachinery[J]. **Computers & Fluids**, 2011(49): 290-301.

[11] COLONNA P., HARINCK J.. real-Gas effects in organic rankine cycle turbine nozzles[J]. **Journal of Propulsion and power**, 2008, 24(2): 282-294.

[12] LEMMON E W., SPAN R. Short fundamental equations of state for 20 industrial fluids[J]. **Journal of Chemical and Engineering Data**, 2006, 51(3): 785-850.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

董焕宇,王智. 有机工质在透平静叶栅内流动的数值研究[J]. **机电工程**, 2014, 31(11): 1425-1428.

DONG Huan-yu, WANG Zhi. Numerical simulation of organic flow in static turbine cascades[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2014, 31(11): 1425-1428.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>